

Jet photonique simple ou double pour la détection d'objets sub-longueur d'onde.

B. Ounnas^{1,2}, B. Sauviac¹, Y. Takakura², S. Leclerc², S. Robert¹, B. Bayard¹

¹Université de Saint-Etienne, F-42000, Saint-Etienne, Télécom Saint-Etienne,
Ecole Associée de l'Institut Mines-Télécom, Laboratoire LT2C

²ICube, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur, de l'Informatique et de l'Imagerie,
UMR Université de Strasbourg - CNRS, F-67412 Illkirch-Graffenstaden, France

Résumé : On appelle « jet photonique » un faisceau électromagnétique ayant une grande concentration de puissance en champ proche. Ce jet photonique possède des propriétés comme une faible divergence et une faible largeur à mi-hauteur. Il peut être appliqué pour la détection d'objet de taille sub-longueur d'onde. Les jets photoniques peuvent être observés pour des longueurs d'onde optiques dans le voisinage d'une sphère diélectrique micrométrique. Ils peuvent être obtenus également dans la gamme des microondes. Dans cet article, nous montrons la réalisation et la mise en évidence de ces jets photoniques dans la gamme microondes. La modélisation développée a permis de mettre en œuvre des systèmes produisant des jets simples ou doubles. L'expérimentation et ses résultats sont présentés et la détection facile d'objets de faible taille devant la longueur d'onde est mise en évidence ainsi que la mise en évidence de leur mouvement.

1. Introduction

Le jet photonique peut être considéré comme une focalisation en champ proche. Quand on éclaire une particule diélectrique (cylindre ou sphère) de quelques longueurs d'onde avec une onde incidente, un faisceau focalisé peut être généré qui possède une très grande concentration de puissance avec une largeur à mi-hauteur d'environ une demi-longueur d'onde tel que la limite de diffraction est atteinte et peut être légèrement dépassée [1-4]. L'étude des caractéristiques du jet photonique (dimension transverse, longueur et pic d'intensité) dans les domaines du visible et des micro-ondes ont été l'objet de plusieurs études théoriques [1-5] et de travaux expérimentaux [5-7]. Ces caractéristiques peuvent être exploitées pour de nombreuses applications : la détection de fluorescence de molécules individuelles [8], l'amplification de la fluorescence à deux photons [9] et de la diffusion Raman [10], la réalisation d'un scalpel optique pour la chirurgie de précision [11]. Les jets photoniques pourraient également être utilisés pour améliorer la densité de stockage de données [12-13], réduire les dimensions transverses de gravure laser [14] et, pour ce qui nous intéresse ici, pour détecter des particules sub-longueur d'onde [5-7,15]. Ce que nous envisageons est d'utiliser des jets photoniques simples ou

doubles : des jets simples pour détecter des particules sub-longueur d'onde et des jets doubles pour déterminer la vitesse de déplacement de ces particules. La solution proposée utilise un guide d'onde à embout, cette solution permet à la fois de générer les jets photoniques et de détecter la lumière rétrodiffusée avec le même composant.

Une méthode basée sur la théorie intégrale a été mise au point. Elle permet d'obtenir la réponse théorique du guide en fonction de la forme de l'embout [16-17]. Dans ce travail nous montrons que les jets photoniques calculés peuvent être obtenus dans le domaine microonde avec un guide d'onde bi-plaque associé à un embout. L'expérimentation est réalisée autour de la fréquence 30 GHz (longueur d'onde en espace libre $\lambda_0=1\text{cm}$). La mesure de la cartographie du champ en sortie du guide permet de valider les résultats simulés au si bien dans le cas d'un jet photonique simple et d'un jet double. Des mesures en réflexion au niveau du guide ont permis de valider la possibilité de détecter la présence d'objets passant dans le jet.

2. Dispositif et modélisation

Le guide est un guide bi-plaque (figure 1). Les dimensions latérales sont suffisamment grandes ($20\lambda_0$) pour pouvoir être considérées comme « infinies », afin de ramener le système à un problème 2D. L'épaisseur du guide est de $3\lambda_0$ afin d'avoir un guide faiblement multimode. Les plaques sont considérées conductrices parfaites. Le guide est plein, en téflon ($\epsilon_r \sim 2$). L'extrémité du guide se termine par un embout, lui aussi en téflon. La forme de cet embout va permettre de créer ou non un ou plusieurs jets photoniques en sortie du guide.

Le calcul du champ est effectué avec une méthode intégrale [17]. La méthode est 2D rigoureuse. Elle est peu gourmande en capacité mémoire et en puissance de calcul. Elle se base sur la seconde identité de Green. Elle est associée à une approche modale qui décrit la décomposition du champ électromagnétique dans le guide en termes de modes. A l'aide de cette méthode

hybride, des embouts qui permettent d'obtenir le phénomène de jet photonique ont été identifiés.

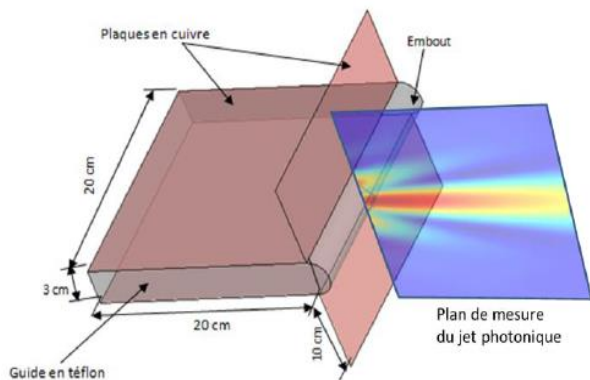


Figure 1. Schéma de principe du guide bi-plaque avec son embout en sortie. Le guide est en téflon ($\epsilon_r \sim 2$). L'embout est également réalisé en téflon. Les plaques sont en cuivre.

3. Réalisation expérimentale

La structure de la figure 1 a été réalisée à l'aide de plaques en cuivre. Les embouts calculés ont été usinés à l'aide d'un tour numérique et sont ensuite fixés en sortie du guide par l'intermédiaire de vis en téflon. Nous avons utilisé un analyseur de réseaux vectoriel (VNA), celui-ci excite un guide rectangulaire fonctionnant dans la bande Ka. Ce guide monomode permet de polariser rectilignement le champ électrique parallèlement à son petit côté. Il est ensuite couplé à un cornet circulaire muni d'une lentille de Fresnel placés à une distance de 30 cm de l'entrée du guide bi-plaques. La lentille collimate le faisceau pour avoir une excitation plane. L'onde se propage dans le guide bi-plaque en téflon sur une distance de 20 cm et débouche sur l'embout en téflon. Un bras motorisé permet ensuite de déplacer dans le plan perpendiculaire à la sortie de l'embout un second guide rectangulaire qui joue le rôle de sonde (figure 2). Ainsi le paramètre de transmission S_{21} est récupéré et permet d'avoir une cartographie relative de la distribution spatiale du champ en sortie du guide.

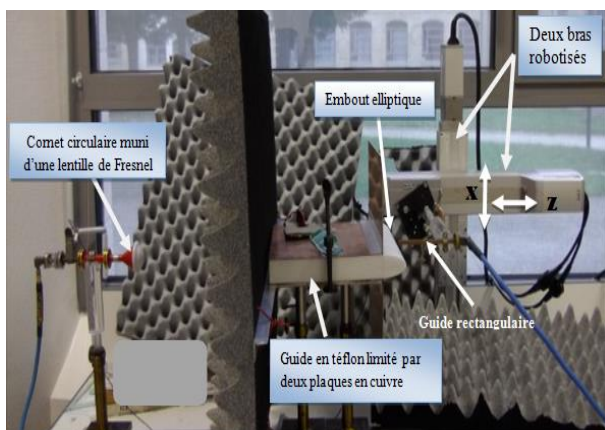


Figure 2. Dispositif expérimental

Pour ensuite démontrer que l'on peut détecter des

objets de petites tailles comparativement à la longueur d'onde, une tige dont le diamètre est faible devant la longueur d'onde est utilisée. Le paramètre de réflexion mesuré en entrée du guide, S_{11} , est alors mesuré lorsque la tige est translatée devant la sortie de dispositif.

4. Mise en évidence expérimentale des jets

L'obtention de jets photoniques simples ou doubles dépend de la géométrie de l'embout. Pour cela le profil de l'embout a été paramétré par un ensemble d'équations analytiques (1).

$$\begin{aligned} x(\theta) &= a \cdot \cos(\theta) \\ z(\theta) &= -b \cdot (\sin \theta + e \cdot \sin 3\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

où le paramètre θ est défini sur l'intervalle $[-\pi; 0]$. La définition du paramètre d'incursion e à zéro produit un profil semi-elliptique. Ce choix de paramétrage a été réalisé parce qu'il est connu qu'un embout elliptique peut générer un simple jet photonique.

Le guide peut être excité avec une polarisation TE (Transverse Electrique) ou une polarisation TM (Transverse Magnétique). Dans le travail présenté ici, on utilise le mode fondamental ($k=1$ pour la polarisation TE, $k=0$ pour la polarisation TM).

4. a. Embout pour un jet simple

Le premier embout terminal étudié est de forme elliptique avec $a = 1,5\text{cm}$, $b = 4\text{cm}$, et $e = 0$. Le guide est excité par le mode TE_1 à une fréquence de 30 GHz. La figure 3 compare les cartographies de la norme du champ électrique obtenues par simulation (figure 3a) et par mesures (figure 3b). Un champ maximal apparaît à la sortie de l'embout se propageant sur une distance d'environ $0,6\lambda_0$ avec une largeur à mi-hauteur d'environ $0,5\lambda_0$. Une relativement bonne similitude peut être constatée entre les distributions de champ mesurée et simulée.

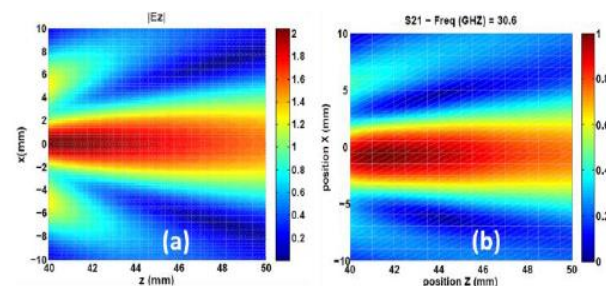


Figure 3. Cartographie du champ électrique en sortie du guide à embout elliptique. Polarisation TE. (a) simulation pour $f=30$ GHz. (b) Mesure normalisée par rapport au champ maximum sur la surface pour 30,6 GHz.

4. b. Embout pour un jet double

Un deuxième embout en téflon paramétré suivant l'ensemble d'équation (1) a été ensuite étudié et réalisé

afin d'obtenir deux jets photoniques en sortie du guide. L'étude a été réalisée pour excitation TM_0 du guide. Le profil de l'embout obtenu a ces paramètres : $a = 1,5\text{cm}$, $b = 2\text{ cm}$ et $e = 0,32$. Le profil de l'embout réalisé est représenté sur la figure 3a. L'avantage ici, d'utiliser un guide d'onde à embout plutôt que deux billes pour produire deux jets photoniques, est d'avoir des faisceaux dont l'espacement (distance inter-jet) est la plus faible possible.

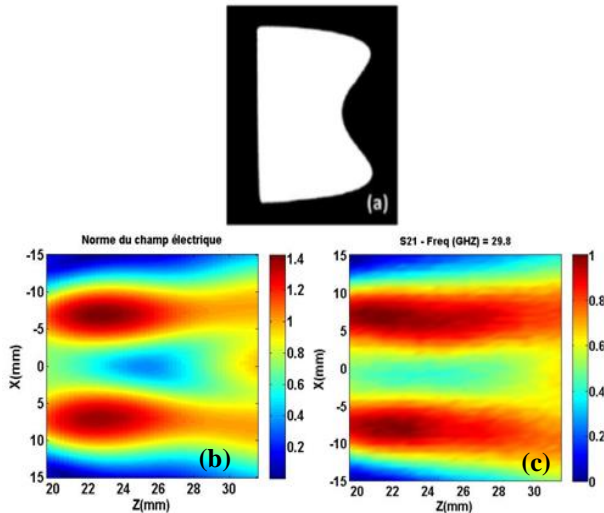


Figure 4. Cartographie du champ électrique en sortie du guide avec embout. Excitation TM_0 . (a) Courbe paramétrée de l'embout. (b) Simulation par méthode équation intégrale pour 30 GHz. (c) Mesure normalisée par rapport au champ maximum sur la surface pour 29,8 GHz.

Le guide est excité par le mode fondamental TM_0 à une fréquence de 30 GHz. Une cartographie de la norme du champ électrique théorique en sortie de l'embout réalisé a été calculée en utilisant la méthode intégrale (figure 4b). Deux faisceaux sont générés avec une largeur à mi-hauteur de $0,5\lambda_0$ et une distance entre leurs centres d'environ $1,5\lambda_0$. Afin de valider expérimentalement ce résultat, nous avons fixé à l'extrémité du guide l'embout réalisé au tour numérique. Une cartographie mesurée pour une fréquence de 29,8 GHz est présentée figure 4c. Elle fait apparaître un double jet photonique avec un espacement entre les deux faisceaux d'environ $1,5\lambda_0$. Une comparaison qualitative montre une relativement bonne similitude entre mesure et simulation. La distance inter-jet peut avoisiner la longueur d'onde, alors que, comme mentionné précédemment, la combinaison de deux sphères individuelles imposerait une distance inter-jet de plusieurs longueurs d'onde. En comparaison avec un jet simple, les caractéristiques opto-géométriques des jets doubles sont similaires : même largeur à mi-hauteur et même distance de propagation. Il est à mentionner l'observation d'une faible asymétrie des deux faisceaux causée par une mauvaise conception de l'embout.

5. Détection de particules

Pour montrer qu'un jet photonique simple peut permettre la détection d'une particule métallique de taille plus petite que la longueur d'onde, une tige métallique de diamètre de $\lambda_0/5$ a été translaturée dans le plan vertical, suivant une trajectoire parallèle à x (figure 3) et éloigné du sommet de l'embout de 2 mm. Le guide a été excité par le mode fondamental TE_1 à une fréquence de 30 GHz. Les coefficients de réflexion S_{11} ont été mesurés fonction de la position de la tige. Le passage de la particule dans le jet photonique simple (embout elliptique) est montré dans la figure 5. Une augmentation significative de la rétrodiffusion est visible lorsque la tige passe dans le jet photonique. On perçoit très bien la présence de la tige dans le jet photonique. Le maximum de réflexion correspond au passage au centre du jet photonique. Nous pensons que le simple jet photonique mène à un système prometteur pour la détection de particules sub-longueur d'onde.

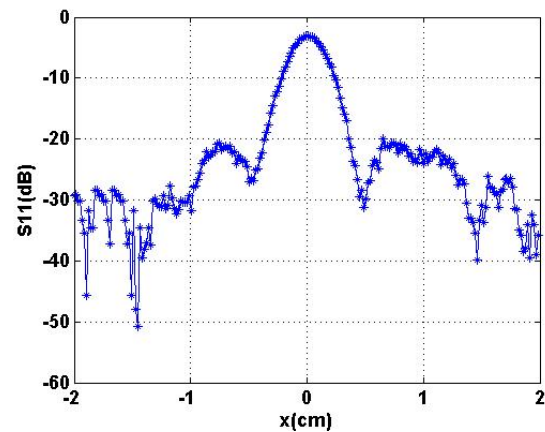


Figure 5. Paramètres de réflexion dans le guide fonction de la position d'une tige métallique horizontale dans un plan à 2mm du sommet de l'embout elliptique du guide (cas d'un jet simple). TE_1 f=30 GHz.

Lorsqu'un objet passe dans un jet photonique, il génère donc un signal facilement détectable en réflexion. Nous proposons d'utiliser les deux jets photoniques identiques non seulement pour détecter des particules sub-longueur d'onde mais aussi pour déterminer la vitesse de déplacement de ces particules. Pour le montrer l'embout paramétré figure 4a a été utilisé pour générer les deux jets. Le guide a été excité par le mode fondamental TM_0 à une fréquence de 30 GHz. Les paramètres de réflexion S_{11} fonction de la position de la tige sont présentés figure 6. Le passage de la tige dans l'un et l'autre des faisceaux se traduit par une augmentation significative de la réflexion dans le guide. Deux maxima observés correspondent au passage de la tige par le centre des jets photoniques avec un espacement d'environ $1,5\lambda_0$. Il est possible d'estimer la vitesse de déplacement de la tige, en relevant le temps entre l'apparition de chaque pic. Il convient de noter que l'espacement entre les deux faisceaux étant faible une bonne estimation de la vitesse peut être atteinte.

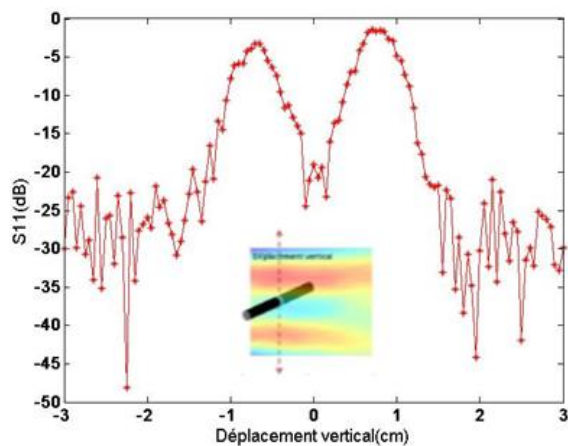


Figure 6. Paramètre de réflexion S_{11} fonction de la position d'une tige métallique horizontale dans un plan à 2mm du sommet de l'embout du guide (double jet). TM_0 , $f=30$ GHz.

6. Conclusion

La possibilité de créer des jets photoniques simples et doubles a été démontrée dans la gamme de fréquences microondes autour de 30 GHz. L'étude a été faite en analysant les cartes de champ. Les comparaisons des cartographies obtenues par simulation et mesures confirment qualitative l'apparition de jets photoniques simple et double en sortie du guide d'onde.

L'utilisation de ces jets pour la détection des particules sub-longueur d'onde a été démontrée et cela avec une sensibilité intéressante grâce aux variations importantes de réflexion induite dans le guide par une tige métallique sub-longueur d'onde située dans les jets photoniques. Outre la détection de particules sub-longueur d'onde, nous avons montré que le double jet permet également la détection du mouvement des particules et donc pourquoi pas la mesure de leur vitesse.

7. Remerciements

Ce travail a eu lieu dans le contexte des projets de recherche « futur et rupture ». Les auteurs tiennent à remercier l'Institut Mines-Télécom et IREPA Laser pour le financement de ces recherches.

8. Bibliographie

- [1] Z. Chen and A. Taflove, «Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique», *Opt. Express* **12**, 1214-1220 (2004).
- [2] S. Lecler, Y. Takakura, and P. Meyrueis, «Properties of a three-dimensional photonic jet», *Opt. Lett.* **30**, 2641-2643 (2005).
- [3] C. Li, G. W. Kattawar, P. W. Zhai, and P. Yang, «Electric and magnetic energy density distributions inside and outside dielectric particles illuminated by a

plane electromagnetic wave», *Opt. Express* **13**, 4554-4559 (2005).

- [4] A.V. Itagi and W. A. Challener, «Optics of photonic nanojets», *J. Opt. Soc. Am. A*, **22**(12), (2005).
- [5] L. Zhao, and C. K. Ong, «Direct observation of photonic jets and corresponding backscattering enhancement at microwave frequencies», *J. Appl. Phys.* **105**, 123512 (2009).
- [6] A. Heifetz, K. Huang, A.V. Sahakian, X. Li, A. Taflove, and V. Backman, «Experimental confirmation of backscattering enhancement induced by a photonic jet», *Appl. Phys. Lett.* **89**, 221118 (2006).
- [7] S. Yang, A. Taflove, and V. Backman, «Experimental confirmation at visible light wavelengths of the backscattering enhancement phenomenon of the photonic nanojet», *Opt. Express* **19**, 7084-7093 (2011).
- [8] D. Gérard, J. Wenger, A. Devilez, D. Gachet, B. Stout, N. Bonod, E. Popov, and H. Rigneault, «Strong electromagnetic confinement near dielectric microspheres to enhance single-molecule fluorescence», *Opt. Express* **16**, 15297-15303 (2008).
- [9] S. Lecler, S. Haacke, N. Lecong, O. Crégut, J.-L. Rehspringer, and Ch. Hirlimann, «Photonic jet driven non-linear optics: example of two-photon fluorescence enhancement by dielectric microspheres», *Opt. Express* **15**, 4935-4942 (2007).
- [10] K. J. Yi, H. Wang, Y. F. Lu, and Z. Y. Yang, «Enhanced Raman scattering by self assembled silica spherical microparticles», *J. Applied Physics* **101**(6): 063528, March 15, (2007).
- [11] Vasily N. Astratov, Arash Darafsheh, Matthew D. Kerr, Kenneth W. Allen, Nathaniel M. Fried, Andrew N. Antoszyk, and Howard S. Ying, «Photonic nanojets for laser surgery», *SPIE Newsroom*. DOI: 10.1117/2.1201002.002578, (2010).
- [12] S.-C. Kong, A. Sahakian, A. Taflove, and V. Backman, «Photonic nanojet enabled optical data storage», *Optics Express*, **16**(18), 13713- 13719, (2008).
- [13] S.-C. Kong, A. V. Sahakian, A. Heifetz, A. Taflove, and V. Backman, «Robust detection of deeply subwavelength pits in simulated optical data-storage disks using photonic jets», *Appl. Phys. Lett.* **92**, 211102, 1-3, (2008).
- [14] E. McLeod and C. B. Arnold, «Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres», *Nature nanotech.*, **3**, 413 (2008).
- [15] Z. Chen, X. Li, A. Taflove, and V. Backman, «Backscattering enhancement of light by nanoparticles positioned in localized optical intensity peaks», *Appl. Optics* **45**, 633-638 (2006).
- [16] H. Halaq, S. Lecler, Y. Takakura, S. Robert, and B. Sauviac, «Waveguide driven photonic jet: FEM, issues and perspectives», Workshop EM IEEE, Saint-Malo, France, 2-3 décembre (2011).
- [17] Y. Takakura, H. Halaq, S. Lecler, S. Robert, B. Sauviac, «Single and Dual Photonic Jets With Tipped Waveguides: An Integral Approach», *Photonics Technology Letters, IEEE*, **24**(17), 1516 - 1518, septembre (2012).